

Estimación de la viscosidad de escorias fayalíticas utilizando el modelo de cálculo k_v y el método experimental del plano inclinado*

V. Bazán**, Ch. Goñi***, L. Castellá****, E. Brandaleze****,
L. F. Verdeja***** y R. Parra**

Resumen

La viscosidad de las escorias representa una de las variables más relevantes de la mayoría de los procesos metalúrgicos y cinética de las operaciones de refinado, dado que es uno de los factores determinantes de la eficiencia en las reacciones entre metal y escoria, tanto como escoria-refractario. En las últimas décadas, los modelos matemáticos de diferentes procesos metalúrgicos han establecido métodos para predecir la viscosidad de mezclas de óxidos fundidos a altas temperaturas, en función de la composición química. El modelo K_v desarrollado por Toguri, basado en los datos ofrecidos por Johansen et. al. y Winterhager, ha propuesto la utilización de un índice (K_v) similar a la relación usada en la industria del acero como el índice de basicidad. Se presentan, en este trabajo, valores de la viscosidad determinados en forma experimental mediante la técnica de plano inclinado.

Palabras clave

Viscosidad. Escorias fayalíticas. Modelo K_v . Método del plano inclinado.

Determination of viscosity of fayalite slags for k_v model and measurements by means of inclined plane

Abstract

The viscosity of the slags represents one of the most relevant variables of most of the processes metallurgical and kinetics of the refine operations, since it is one of the decisive factors of the efficiency in the reactions between metal and slag, as much as slag - refractory. In the last decades, the mathematical models of different metallurgical processes have established methods to predict viscosity of mixtures of oxides fused to high temperatures in function of the chemical composition. The model developed by Toguri, based on the data reported by Johansen and Winterhager et al has proposed the K_v model. The used index it is similar to the relationship used in the steel industry like the basicity index. It is presented in this work values determined of viscosity in experimental form by means of the technique of inclined plane.

Key words

Viscosity. Fayalite slags. K_v model. Method of the inclined plane.

* Trabajo recibido el día 18 de marzo de 2005 y aceptado en su forma final el día 19 de octubre de 2005.

** Universidad de Concepción. Facultad de Ingeniería. DIMET, Casilla 160-C. Concepción. Chile.

*** Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Universidad de Católica del Norte, Avda. Angamos 0610, Antofagasta, Chile.

**** Instituto Argentino de Siderurgia (IAS), Avda. Central y Calle 19 Oeste, 2900 San Nicolás. Provincia de Buenos Aires. Argentina.

***** Universidad de Oviedo. Escuela de Minas. Siderurgia. Independencia 13. Oviedo 33004. España.

1. INTRODUCCIÓN

La viscosidad de las escorias es una propiedad de relevancia, ya que afecta fuertemente a la cinética de la corrosión de los refractarios por las escorias. Valores muy elevados de la viscosidad del fundido retrasarían el fenómeno de penetración a través de poros y bordes de grano del material refractario. La viscosidad también afecta a la velocidad de disolución del refractario ya que incide en el transporte molecular a través de la capa de la interfase refractario/escoria fundida^[1 y 2].

Por otra parte, la viscosidad de las escorias es una variable a considerar en los procesos de reducción y afino de metales (por ejemplo, en la conversión de matas de cobre) pero, en muchas ocasiones, su utilización se ha visto postergada por las dificultades que ofrece su determinación^[3-5].

La viscosidad presenta una fuerte dependencia con la temperatura. La mayoría de los investigadores dedicados a estudiar las propiedades físicas de escorias, en general dan cuenta de un comportamiento que sigue la ley de *Arrhenius* de la viscosidad con la temperatura.

Existen varios modelos para calcular la viscosidad de las escorias utilizadas en la industria del acero pero que no son aplicables en la industria del cobre^[6]. También, existen algunos modelos teóricos que permiten estimar valores de viscosidad en escorias fayalíticas que provienen del proceso de conversión de cobre. El modelo teórico *Kv*^[7] se utiliza para calcular viscosidades en escorias fayalíticas del proceso Mitsubishi, en base a la composición química.

A pesar de la escasa información existente en la literatura se han podido comprobar algunos hechos empíricos en las escorias fayalíticas del sistema $\text{Fe}_x\text{O} - \text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ ^[8]:

- El aumento del contenido de SiO_2 en el rango 0-30 % aumenta la viscosidad y la disminuye entre 30-40 %, para volverla a aumentar por encima del 40 % de SiO_2 .
- El aumento del contenido de Fe_xO y Al_2O_3 disminuye la viscosidad.
- El aumento en el contenido de CaO aumenta la viscosidad.
- El aumento en la basicidad de la escoria disminuye la viscosidad.
- El aumento de la temperatura disminuye la viscosidad.

Estas observaciones se han llevado a cabo a través de numerosas pruebas de laboratorio y de datos de plantas de la metalurgia primaria del cobre^[5]. Una recopilación de los resultados obtenidos se muestra en la figura 1.

Con el objeto de realizar una determinación sencilla de los valores de la viscosidad en escorias fayalíticas se utiliza la técnica del plano inclinado. Cabe mencionar que la determinación de valores de esta propiedad, a altas temperaturas, en forma experimental, representa una tarea compleja. La técnica del plano inclinado^[9] consiste en un método simple que proporciona datos sobre escorias a temperaturas similares a las del proceso. Una técnica similar se utiliza para medir la colabilidad de las fundiciones.

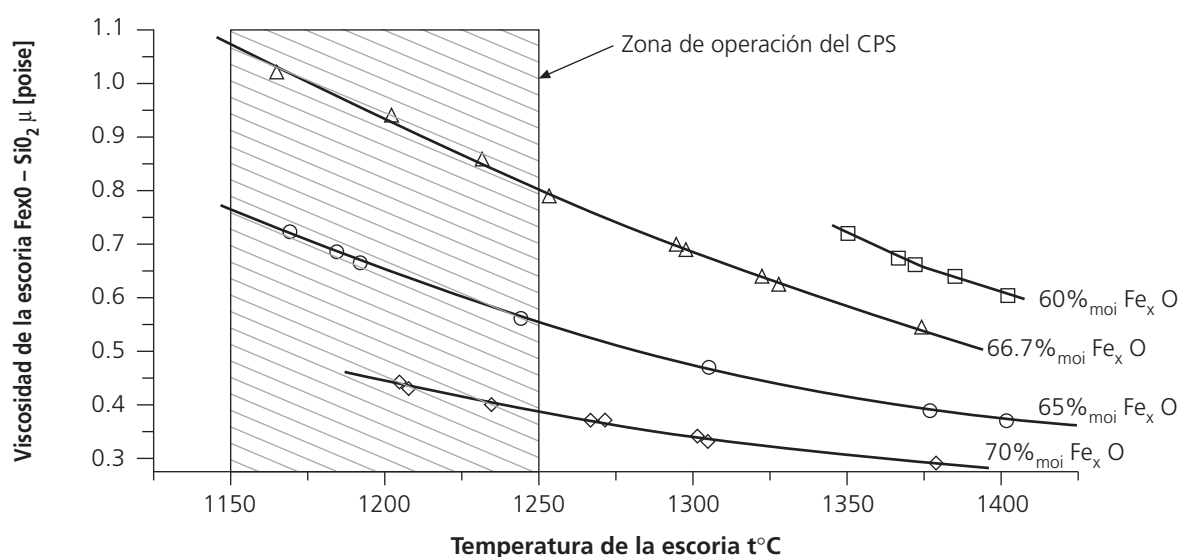


Figura 1. Efecto de la temperatura y contenido de Fe_xO en la escoria sobre la viscosidad.

Figure 1. Effect of the temperature and Fe_xO content in the slag on the viscosity.

2. EXPERIMENTAL

2.1. Estimación de valores de la viscosidad según el modelo Kv

Muchos estudios tratan de determinar las ecuaciones para calcular la viscosidad de las escorias en un rango relativamente amplio de composiciones y temperaturas, usando parámetros empíricos simples en sistemas multicomponentes^[10]. Sin embargo, la determinación de la viscosidad en estos sistemas es complicada y aún no se encuentra totalmente desarrollada desde el punto de vista teórico. En consecuencia, el estudio de la viscosidad y sus efectos sobre los sistemas fundidos a altas temperaturas, aun no está completamente definido por lo que no existe un acuerdo global en la comunidad científica dedicada a su estudio y aplicación.

El modelo desarrollado por Toguri^[7] se basa en datos bibliográficos de la viscosidad y se ajusta a un índice denominado Kv , que representa la relación porcentual “base/ácido”, conocida en la industria siderúrgica como índice de basicidad.

$$Kv = \frac{(FeO + Fe_3O_4 + CaO + MgO)}{(SiO_2 + Al_2O_3)} \quad (1)$$

El índice Kv es mucho más sensible a cambios en la composición química que el índice de basicidad para las escorias básicas. Existe una relación simple del índice Kv con respecto a algunas temperaturas como se expresa en las siguientes ecuaciones:

$$A \ 1250^\circ C \ \mu(poise) = 11,243 \ Kv^{-3,481} \quad (2)$$

$$A \ 1220^\circ C \ \mu(poise) = 13,935 \ Kv^{-3,5234} \quad (3)$$

$$A \ 1190^\circ C \ \mu(poise) = 15,797 \ Kv^{-3,4322} \quad (4)$$

Haciendo uso de las ecuaciones anteriores, la viscosidad a cada temperatura puede ser calculada para cada valor de Kv que viene definido por la composición química de la escoria.

La linealidad de estas curvas es bastante buena y confirma la relación con la ecuación de Arrhenius. La ecuación es la siguiente:

$$\mu(poises) = 0,0061 \exp \left(\left(\frac{1283,45}{T} - 3,2788 \right) \right) \quad (5)$$

$$Kv + \frac{11422,6}{T}$$

El índice Kv es, esencialmente, empírico y por lo tanto es difícil de estimar la viscosidad usando un amplio rango de composiciones de escoria.

2.2. Aplicación a escorias fayalíticas

La composición química de las escorias de conversión que se consideraron, tanto en la determinación de valores de viscosidad mediante el modelo Kv ^[7] como en los ensayos de plano inclinado, con el fin de comparar resultados, se presenta en la tabla I.

Tabla I. Composición de escorias de conversión, % en masa

Table I. Composition of conversion's slag, % in mass

Muestra	Fe	Cu	SiO ₂	Fe ₃ O ₄	FeO	Cu ₂ O	Impurezas Al ₂ O ₃ , CaO, MgO
A	44,14	4,23	35,12	25,7	25,54	4,76	8,87
B	48,69	3,51	32,87	18,5	35,30	3,95	9,37
C	46,59	4,19	32,76	18,2	33,42	4,72	10,90
D	52,87	4,11	23,73	41,9	22,55	4,63	7,19
E	47,27	2,93	34,04	16,5	35,33	3,30	10,83
F	46,46	6,04	30,20	35,1	21,06	6,80	6,84
G	47,3	3,6	31,69	19,6	33,12	4,05	11,54

Los valores de viscosidad obtenidos mediante el cálculo teórico, utilizando el modelo mencionado sobre las muestras de escorias de conversión para distintas temperaturas, se pueden observar en la tabla II.

En la figura 2 se puede observar el comportamiento de la viscosidad en función de la temperatura y la composición para cada una de las escorias.

2.3. Determinación de valores de la viscosidad mediante plano inclinado

La determinación experimental de la viscosidad a altas temperaturas requiere instrumentos y equipos

Tabla II. Valores de viscosidad calculados a diferentes temperaturas, *poise*

Table II. Values of viscosity calculated to different temperatures, poise

Muestra	1.050 °C	1.100 °C	1.200 °C	1.300 °C	1.400 °C	1.480 °C
A	11,63	8,07	4,18	2,35	1,42	0,99
B	7,71	5,32	2,72	1,52	0,91	0,63
C	8,88	6,14	3,16	1,77	1,06	0,73
D	0,64	0,42	0,20	0,11	0,06	0,04
E	10,04	6,95	3,59	2,01	1,21	0,84
F	4,61	3,15	1,59	0,88	0,52	0,36
G	7,25	4,99	2,55	1,42	0,85	0,59

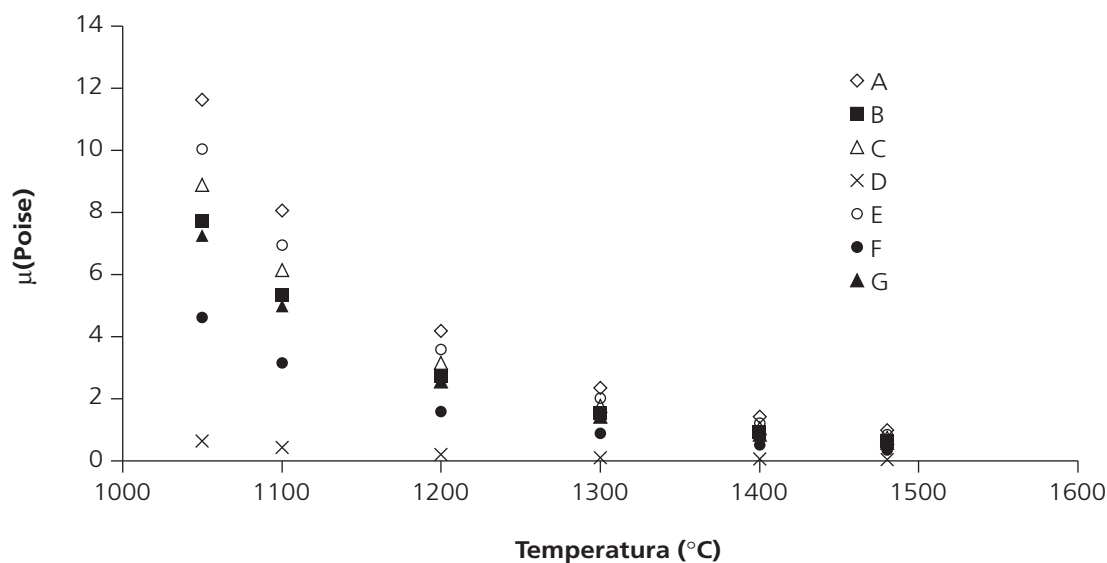


Figura 2. Viscosidad estimada para cada escoria mediante el modelo Kv en función de la temperatura.

Figure 2. Estimated viscosity for each slag by means of Kv model in function of the temperature.

específicos, que no resultan generalmente de fácil acceso, para realizar estimaciones de viscosidad sobre escorias a nivel industrial. Surge así la posibilidad de realizar ensayos utilizando el método desarrollado por Mills^[8], que se ha modificado para este tipo de escorias, consistente en calentar un crisol a una temperatura de 1.000 °C durante 15 h y, posteriormente, elevar la temperatura a 1.480 °C (temperatura de fluidez de la mayoría de las escorias). Una vez estabilizada la temperatura seleccionada para el ensayo se agregan 15 g de la escoria a estudiar que se deja por un tiempo de 40 min con el objetivo de realizar un baño de escoria en el ladrillo refractario. Después de volcar la escoria, se introducen nuevamente 10 g de escoria y se calienta durante 25 min a 1.480 °C en una atmósfera oxidante y, luego, se vuelca en el plano inclinado previa graduación del ángulo.

Como resultado la escoria genera una capa de longitud determinada. La viscosidad del fundido puede ser determinada a partir de la correlación entre la longitud de la capa (*l*) y la inversa de la viscosidad (μ^{-1}).

Antes de iniciar las mediciones se determinan las temperaturas de reblandecimiento y fusión de las escorias para evaluar el comportamiento de estos materiales frente a la temperatura. Estas determinaciones se realizan con el equipo LECO AF 500 por duplicado. Los resultados de las mismas se presentan en la tabla III.

Las mediciones se realizan sobre las muestras de escorias calentadas en crisoles de cromo/magnesia a una temperatura final de 1.480 °C. Alcanzada la

Tabla III. Temperaturas de reblandecimiento y fusión de las escorias, °C

Table III. Softening and melting temperatures of slags, °C

Muestra	Promedio T.I ¹ (°C)	Promedio T.A ² (°C)	Promedio T.H ³ (°C)	Promedio T.F ⁴ (°C)
A	1.435	1.451	1.462	1.463
B	1.414	1.434	1.452	1.456
C	1.444	1.453	1.458	1.459
D	1.422	1.440	1.448	1.457
E	1.464	1.474	1.484	1.489
F	1.448	1.452	1.458	1.462
G	1.447	1.457	1.465	1.467

¹ T. I.: temperatura inicial, aquella temperatura en la cual empieza a caer la punta del cono.

² T. A: temperatura de ablandamiento, temperatura en la cual se ha fundido arriba y su base permanece igual.

³ T. H: temperatura de hemisferio, temperatura a la cual el cono ha fundido como un hemisferio.

⁴ T. F: temperatura de fluidez, es la temperatura en la cual el cono esta totalmente fluido.

homogeneidad térmica de la muestra en la cámara de la mufla, se retira y vuelca sobre el plano inclinado, manteniendo un ángulo de 10° en un tiempo no superior a 6 s. En la figura 3 se presenta una imagen del mencionado plano inclinado con la capa de escoria generada luego del vuelco en uno de los ensayos. Los resultados obtenidos de los ensayos se presentan en la tabla IV.

En la figura 4 se muestra la relación entre la viscosidad estimada por el método Kv y la longitud



Figura 3. Escoria sometida a un ensayo de plano inclinado.

Figure 3. Slag subjected to a test of inclined plane.

medida por medio del plano inclinado. Se obtiene una correlación logarítmica que relaciona la longitud, L , en función de la fluidez, con una regresión del 0,99, y un intervalo de confianza del 99% representada de la siguiente manera:

$$\ln(1/\mu) = a + b(L)^3 \quad (6)$$

donde, $a = -0,423$ y $b = 2,56 \exp^{-09}$.

3. ANALISIS DE RESULTADOS

Se comparan los valores de la viscosidad obtenidos mediante el cálculo teórico por el modelo Kv , con los determinados en forma experimental con respec-

Tabla IV. Resultados de longitudes de capa mediante ensayos realizados a 1480 °C en plano inclinado, mm.

Table IV. Results of layer lengths by means of tests carried out to 1480 °C in inclined plane, mm.

Muestra	Longitud (mm)
A	620
B	800
C	570
D	1.123
E	460
F	800
G	820

to al contenido de sílice. De acuerdo al trabajo realizado por Wright y Zhang^[11], a 1.300°C, en escorias tipo fayalíticas se observa que, en la mayoría de los ensayos realizados, los valores estimados de la viscosidad se encuentran desplazados del modelo Kv en unos 0,5 poise.

En algunos casos, la fayalita produce un máximo de viscosidad local como la observada en los trabajos de Urbain, Shiroski y Kaiura, quienes informan que existe dicho máximo a una presión parcial de O_2 más alta que la correspondiente a la saturación del hierro^[11]. Sin embargo, hay otras mediciones bajo condiciones de saturación que no producen un máximo, como la realizada por Ji y Ducret y Rankin^[12]. Este hecho es consistente con otras mediciones realizadas por Kurcharki, Kairua y Vartainen en condiciones de atmósfera controlada con crisoles de molibdeno^[11]. En la figura 5, se presenta una comparación de valo-

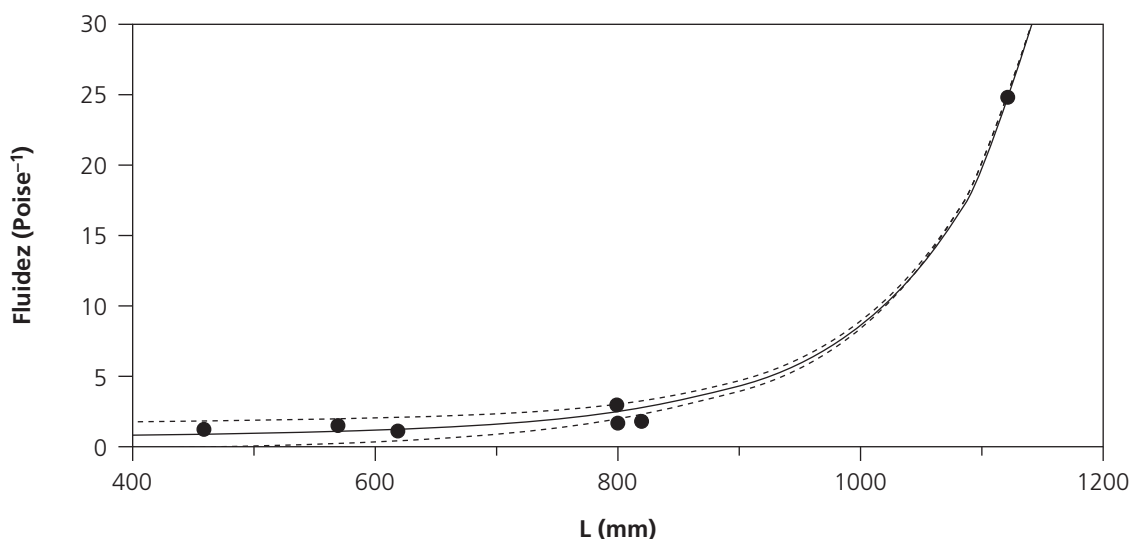


Figura 4. Valores de fluidez vs longitud mediante el ensayo de plano inclinado para escorias a 1480°C.

Figure 4. Value of fluidity vs length by means of the test of inclined plane for slag at 1480°C.

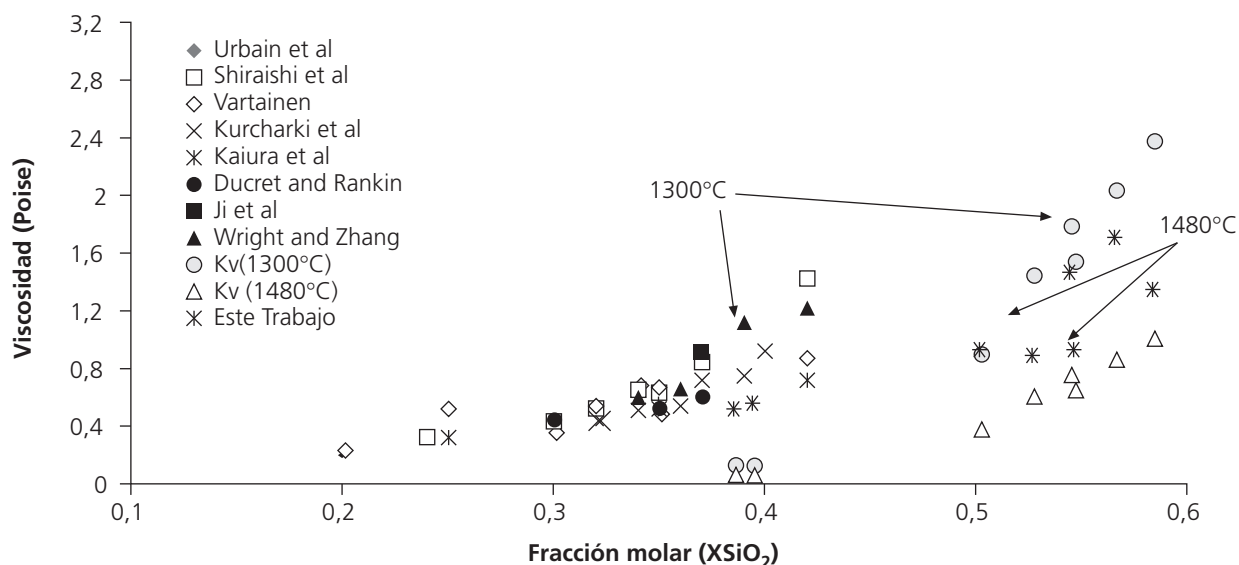


Figura 5. Comparación de las mediciones de la viscosidad de fundidos silicatados de hierro.

Figure 5. Comparison of the measurements of viscosity of silicate fused of iron.

res de viscosidad que informan los autores mencionados y se observa que la viscosidad aumenta con el incremento de la fracción molar del SiO_2 .

Los valores de la viscosidad de las escorias en estudio a 1.480 °C, obtenidos empleando la técnica del plano inclinado se corrigen, incrementando su valor en 0,5 Poise. La corrección responde a la diferencia de los valores obtenidos mediante el cálculo teórico con el modelo Kv . (Fig. 5).

Se deduce de los resultados de la viscosidad calculados mediante el modelo teórico que la variación en el porcentaje de SiO_2 incide considerablemente en los valores de esta propiedad física para las escorias. Se observa, además, un incremento gradual de la viscosidad con el aumento del contenido de SiO_2 . No obstante, cabe aclarar que la dispersión en los valores indica el efecto de los otros óxidos presentes en la composición química de estos materiales.

El efecto de los óxidos de hierro sobre las propiedades de las escorias produce efectos opuestos. Así, el FeO se considera un modificador de la red vítrea de la escoria, esto implica romper las cadenas silicatadas con la consiguiente disminución de la viscosidad. Por el contrario, el Fe_2O_3 es anfótero y puede causar un doble efecto^[10 y 13]

En el estudio realizado por Viswanathan^[14] se miden viscosidades en crisoles de níquel y hierro, en el sistema binario Fe_nO-SiO_2 como una función de la temperatura en condiciones oxidantes, lo que permite observar que cuanto mayor es el tiempo de oxidación el componente Fe^{3+} provoca un aumento de la viscosidad.

En la figura 6, se comprueba que para una rela-

ción de Fe/SiO_2 menor que 2, la viscosidad disminuye cuando el contenido de Fe^{3+} aumenta; sin embargo, para una relación de Fe/SiO_2 mayor que 2, el contenido de Fe^{3+} tiene una pequeña influencia en el efecto de la viscosidad.

En este trabajo, además del efecto del SiO_2 , se pudo determinar que el Fe^{3+} tiene una influencia relativa sobre la viscosidad de las escorias fayalíticas.

En el proceso de conversión de cobre la viscosidad de la escoria debe mantenerse en un rango especificado para minimizar las pérdidas de cobre. Así pues, la viscosidad de la escoria además de ser una variable determinante en el desgaste del material refractario incide en la transferencia de masa en la interfase escoria-mata y la transferencia de calor a través de la escoria^[1, 2 y 5].

Por esta razón, la posibilidad de obtener valores de viscosidad en forma experimental en laboratorios dedicados al control del proceso, donde no es común disponer de instrumentos sofisticados para estas medidas a altas temperaturas, la técnica del plano inclinado representa una herramienta de gran utilidad. Este método simple y de bajo costo que ofrece datos que orientan al operador si debe o no modificar la composición de las escorias evitando así pérdidas de cobre en las escorias o la infiltración de las mismas en el refractario por su baja viscosidad.

4. CONCLUSIONES

— El modelo Kv permite establecer valores de la viscosidad a distintas temperaturas de las escorias fayalíticas, en forma rápida, mediante cálculo.

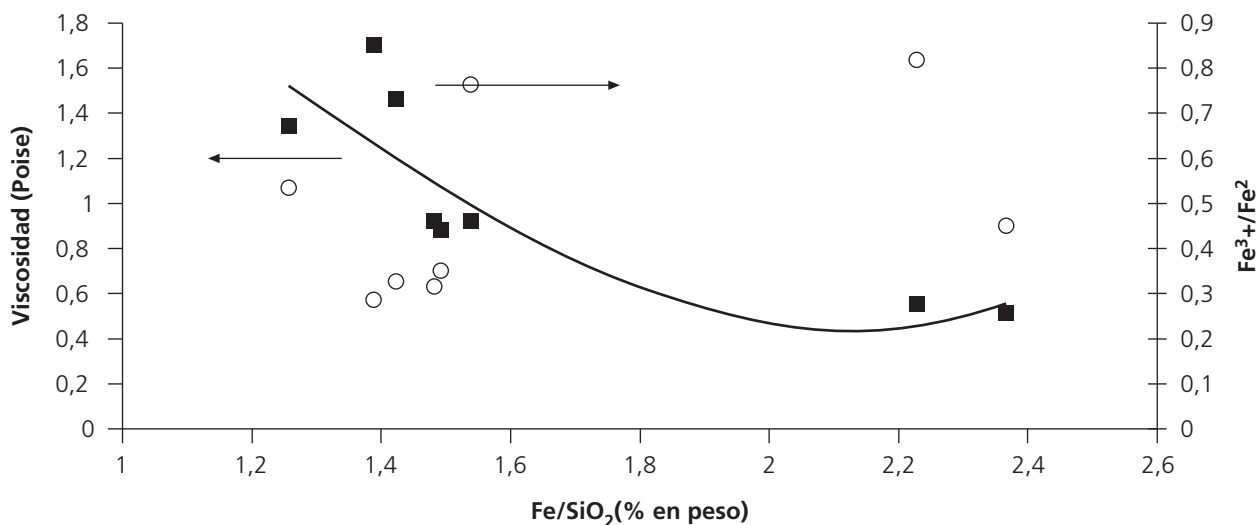


Figura 6. Influencia de la composición sobre la viscosidad.

Figure 6. Influences of the composition on the viscosity.

los matemáticos simples que involucran la composición química.

- Los datos de viscosidad obtenidos en este trabajo y los determinados por otros autores permiten confirmar que el modelo que se propone, presenta un desplazamiento aproximado de 0,5 poise con respecto a los datos experimentales.
- El control de la viscosidad de las escorias por la técnica del plano inclinado puede contribuir a mejorar las pérdidas de cobre en escorias, el desgaste prematuro del convertidor o a incrementar la velocidad de transferencia de masa y de calor en los CPS (Convertidores Peirce-Smith).
- La estimación de valores de viscosidad en forma experimental a través de la técnica del plano inclinado representa una valiosa herramienta para ensayos de control y rutina en lugares donde no se dispone de viscosímetros apropiados.

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer los apoyos que bajo diferentes conceptos han realizado al MEC (MAT 2003-00502), al MAEC- AECI (PCI-B/1629/04), a la fundación Andes-Chile, a la fundición Chagres-Chile, y al IAS- Argentina.

REFERENCIAS

- [1] K. W. NG., J. P. T. KAPUSTA, R. HARRIS, A. E. WRAIT Y R. PARRA, *JOM* 57 (2005) 52-57.

- [2] R. PARRA, L. F. VERDEJA, M^a. F. BARBÉS, Ch. GOÑI y V. BAZÁN, *JOM* 57 (2005) 29-36.
- [3] M. VARGAS-RAMÍREZ, *Rev. Metal. Madrid* 39 (2003) 123-131.
- [4] J.C. ESCOLEDO, J. F. HERNÁNDEZ, S. ESCOLEDO, A. FLORES y D. A. CORTÉS. *Rev. Metal. Madrid* 39 (2003) 172-182.
- [5] J. P. SANCHO, L. F. VERDEJA y A. BALLESTER, *Metalurgia Extractiva: Procesos de Obtención*. Ed. Síntesis, Madrid, España, 2000, pp. 267-273.
- [6] T. HEPUT, E. ARDEKEAN E I. KISS. *Rev. Metal. Madrid* 41 (2005) 220-226.
- [7] N. HASEGAWA y F. TANAKA. *VI Conf. Molten Slags Fluxes and Salts*, (2000).
- [8] K. C. MILLS, M. HALALI y H. P. LÖRZ, *V Conf. Molten Slags, Fluxes and Salts* (1997) 535 - 542.
- [9] Ch. GOÑI. Tesis Doctoral. Facultad de Ingeniería. Universidad de Concepción, Chile 2004.
- [10] E. BRANDALEZE y M. BETANCOUR. *Jornadas SAM - CONAMET 2001*.
- [11] S. WRIGHT y L. ZHANG, *VII Conf. Molten Slags Fluxes and Salts*, (2004) 231-235.
- [12] A.C DUCRET Y W.J. RANKIN. *Scan. J. Metall.* 31 (2002) 59-67.
- [13] A. BALLESTER, L. F. VERDEJA, J. P. SANCHO. *Metalurgia Extractiva: Fundamentos*. Ed. Síntesis, Madrid, España (2000) pp. 268- 277.
- [14] N.VISWANOTHAN, F-Z. JI, D.SICHEN Y S. SEETHARAMAN, *ISIJ Int.* 41 (2001) 722-727.